

Analiza wpływu generacji rozproszonej na wybrane parametry jakości energii elektrycznej w sieci niskiego napięcia na terenie klastra Wirtualna Zielona Elektrownia Ochothnica

Streszczenie. W artykule przedstawiono wpływ jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych o mocy 2 kW na wybrane parametry jakości energii elektrycznej zmierzone w pewnej sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia, w której udział prosumentów stanowi 48%, zlokalizowanej na terenie klastra Wirtualna Zielona Elektrownia Ochothnica.

Abstract. The article presents the impact of 2 kW single-phase photovoltaic installations on selected power quality parameters measured in a certain distribution low-voltage electricity network with the share of prosumers of 48%, located within the energy cluster Virtual Green Ochothnica Power Plant in Poland. (Analysis of the impact of dispersed generation on selected aspects of power quality in a low-voltage electricity network located in the area of energy cluster Virtual Green Ochothnica Power Plant).

Słowa kluczowe: jednofazowe mikroinstalacje, asymetria napięć i prądów, wzrosty napięcia, prosument.

Keywords: single-phase microinstallations, voltage and current unbalance, voltage swells, prosumer.

Wstęp

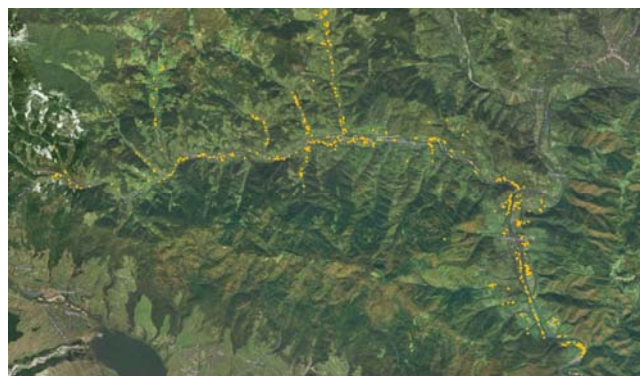
Gmina Ochothnica Dolna od dłuższego czasu prowadzi intensywne działania na rzecz ochrony środowiska oraz bezpieczeństwa energetycznego regionu, poprzez sukcesywny wzrost udziału odnawialnych źródeł energii w swoim bilansie energetycznym. W 2015 roku na terenie gminy powstała farma fotowoltaiczna zasilająca jedną z oczyszczalni ścieków o mocy znamionowej 200 kW wraz z systemem magazynowania energii w technologii litowo-jonowej o pojemności 120 kWh. Tego samego roku powstała również instalacja fotowoltaiczna na budynku Zespołu Szkolno-Przedszkolnego o mocy znamionowej 22 kW oraz zabudowano na dachach domów jednorodzinnych 120 sztuk instalacji fotowoltaicznych o mocy znamionowej 2 kW, służących do grzania ciepłej wody użytkowej (bez możliwości oddawania nadwyżek energii do sieci dystrybucyjnej). Gmina nie poprzestała na dotychczasowych działaniach i w 2017 roku w ramach programu priorytetowego Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej „Wspieranie rozproszonych, odnawialnych źródeł energii” zabudowano na dachach domów jednorodzinnych kolejne 726 jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych o mocy znamionowej 2 kW służących do grzania wody, tym razem z możliwością oddawania nadwyżek wyprodukowanej energii do sieci dystrybucyjnej. Tym sposobem niemal 1/3 budynków całej gminy posiada instalacje fotowoltaiczne, dzięki którym ich mieszkańcy zaspokajają część swoich potrzeb energetycznych. Z kolei w 2018 roku, Ministerstwo Energii na wniosek gminy Ochothnica Dolna dokonało certyfikacji klastra energii Wirtualna Zielona Elektrownia Ochothnica [1].

Niestety, poza niewątpliwymi aspektami ekologicznymi, właściciele jednofazowych instalacji fotowoltaicznych zabudowanych w 2017 roku zgłaszają do Operatora Systemu Dystrybucyjnego (OSD) reklamacje dotyczące nieprawidłowej pracy ich mikroinstalacji. Prosumenci najczęściej skarżą się na odstawianie się falowników z powodu wysokiego napięcia w sieci oraz asymetrię napięcia zasilającego, co wpływa niekorzystnie na pracę urządzeń trójfazowych.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki pomiarów wybranych parametrów jakości energii elektrycznej wykonanych analizatorami klasy A, w pewnej sieci

dystrybucyjnej niskiego napięcia z 48% udziałem jednofazowych mikroinstalacji prosumenckich.

Na rysunku 1 przedstawiono 726 jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych rozmieszczonych na terenie gminy Ochothnica Dolna.



Rys. 1. Lokalizacja 726 jednofazowych mikroinstalacji (żółte punkty) na terenie gminy Ochothnica Dolna (opracowanie własne)

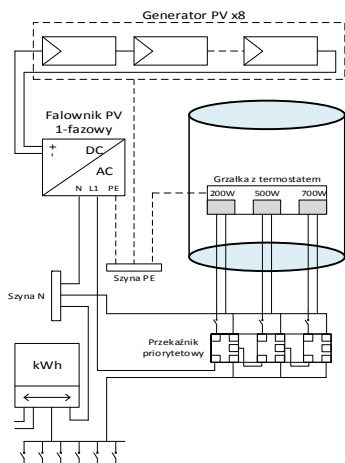
Opis pracy jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych

Wszystkie 726 jednofazowych mikroinstalacji zostało zaprojektowane w taki sposób, aby w pierwszej kolejności energia elektryczna dostarczana z paneli fotowoltaicznych poprzez falownik była wykorzystywana na potrzeby grzania ciepłej wody użytkowej w bojlerze.

W tym celu tzw. przełącznik priorytetowy decyduje o załączeniu poszczególnych modułów grzałek, na podstawie pomiaru temperatury wody w zbiorniku. W przypadku, gdy woda osiągnie zadaną temperaturę, przełącznik priorytetowy wyłącza grzałki i załącza falownik na instalację wewnętrzną odbiorcy. Jeśli odbiorca ma do tej fazy przyłączone odbiorniki energii elektrycznej, to będą one zasilone z instalacji fotowoltaicznej, a nadwyżki energii zostaną oddane do sieci dystrybucyjnej [1]. W skład każdej z 726 mikroinstalacji wchodzi [1]:

- 8 paneli polikrystalicznych, każdy o mocy 250 W,
- przełącznik priorytetowy,
- grzałka z termostatem i modułami 200 W, 500 W i 700 W,
- jednofazowy falownik o mocy 2 kW.

Układ pracy pojedynczej mikroinstalacji przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat podłączenia jednofazowej mikroinstalacji fotowoltaicznej o mocy 2 kW z bojlerem oraz instalacją odbiorcy (opracowanie własne)

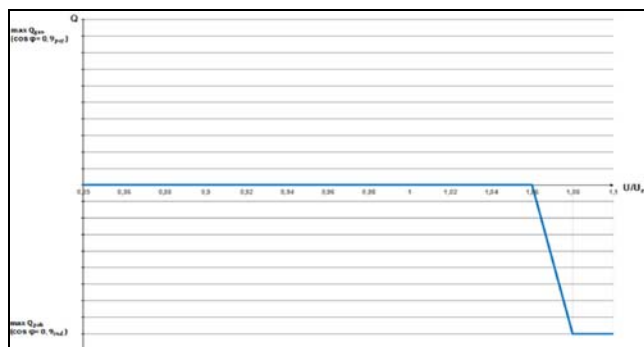
Wymagania stawiane falownikom mikroinstalacji prosumenckich przyłączanych do sieci dystrybucyjnej

Falowniki mikroinstalacji prosumenckich przyłączane do sieci dystrybucyjnej muszą spełniać wymagania określone m.in. w normie [2]. Zgodnie z jej zapisami, każda mikroinstalacja powinna być wyposażona w dwa stopnie zabezpieczenia nadnapięciowego [2]:

- pierwszy stopień ($U>$) – jeśli 10-minutowa średnia wartość skuteczna napięcia przekroczy 253 V, to instalacja musi zostać odłączona od sieci w czasie do 3 sekund,
- drugi stopień ($U>>$) – jeśli wartość skuteczna napięcia przekroczy 264,5 V, to instalacja musi zostać odłączona od sieci w czasie 0,1 – 0,2 sekundy.

Ponowne załączenie mikroinstalacji jest dopuszczalne przy spełnieniu warunku, który mówi, że wartość skuteczna napięcia w sieci musi zawierać się w przedziale 195,5 – 253 V, przy minimalnym czasie obserwacji wynoszącym 60 sekund [2]. Tym sposobem sieć dystrybucyjna i urządzenia odbiorców są chronione przed niebezpiecznym wzrostem wartości skutecznej napięcia ponad wartość dopuszczalną, wynoszącą 253 V.

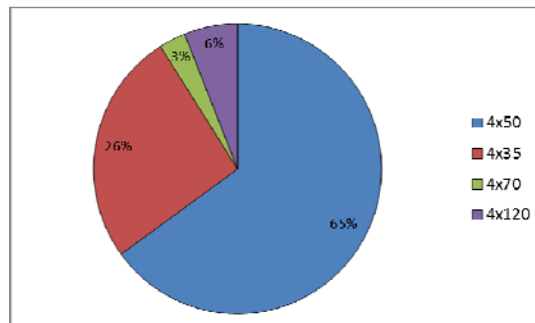
Z kolei, zgodnie z zaktualizowanym wewnętrznym dokumentem OSD [3], każda jednofazowa mikroinstalacja, w celu ograniczenia wzrostu wartości skutecznej napięcia na jej zaciskach powinna być wyposażona w tryb regulacji mocy biernej w zależności od aktualnej wartości skutecznej napięcia w sieci dystrybucyjnej. Wymaganą przez dokument [3] charakterystykę przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Wymagana przez IRIESD [3] charakterystyka sterowania mocą bierną w funkcji wartości skutecznej napięcia $Q = f(U)$ dla mikroinstalacji jednofazowych

Sieć niskiego napięcia na terenie gminy Ochotnica Dolna

Obwody sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia, do której zostały przyłączone jednofazowe mikroinstalacje są w większości wykonane przewodami aluminiowymi o przekroju $4 \times 50 \text{ mm}^2$. Długości obwodów zawierają się w przedziale 200-950 metrów. Na rysunku 4 przedstawiono procentowe udziały poszczególnych przekrojów przewodów sieci niskiego napięcia zlokalizowanej na terenie gminy.

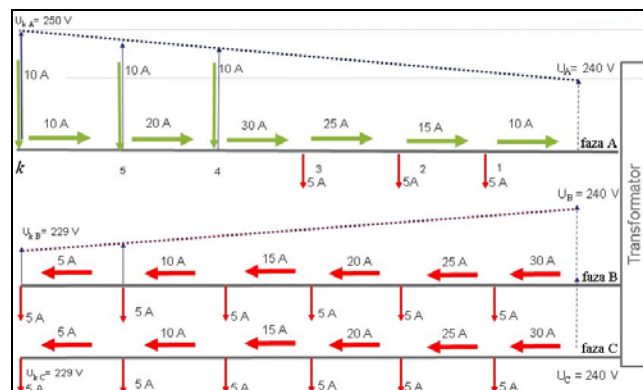


Rys. 4. Struktura sieci niskiego napięcia na terenie gminy Ochotnica Dolna (opracowanie własne)

Gmina Ochotnica Dolna została zelektryfikowana na początku lat 70 ubiegłego wieku. Przekroje przewodów oraz długości obwodów zostały dobrane przez projektantów do jednokierunkowego przepływu energii, z uwzględnieniem współczynników jednoczesności zawierających się w przedziale 0,2 – 0,07 (dobieranych w zależności od liczby odbiorców zasilanych z danego obwodu). Do momentu zabudowy mikroinstalacji w 2017 r., do OSD sporadycznie wpływały reklamacje na parametry jakościowe dostarczanej energii. Niestety, duża koncentracja jednofazowych mikroinstalacji powoduje, że w godzinach największego nasłonecznienia większość generowanej energii jest oddawana do sieci dystrybucyjnej (w tych godzinach występuje małe zapotrzebowanie odbiorców na energię), co oznacza, że współczynnik jednoczesności dla generacji jest praktycznie równy 1. Praca sieci dystrybucyjnej w warunkach dla niej nieprzewidzianych powoduje częste problemy ze wzrostami i asymetrią napięć.

Wpływ jednofazowych mikroinstalacji na wartość skuteczną napięcia w sieci dystrybucyjnej

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy rozptył prądów w układzie trójfazowym z jednofazowymi odbiornikami i źródłami odnawialnymi, obrazujący typową sytuację występującą w okresach największego nasłonecznienia w sieciach niskiego napięcia zlokalizowanych na terenie gminy Ochotnica Dolna.



Rys. 5. Rozptył prądów w układzie trójfazowym z jednofazowymi odbiornikami (czerwony kolor strzałkowania) i źródłami odnawialnymi (zielony kolor strzałkowania) (opracowanie własne)

W typowej promieniowej sieci dystrybucyjnej bez udziału źródeł odnawialnych, prąd płynie od stacji transformatorowej do odbiorników, stąd wartości skuteczne spadków napięć pomiędzy poszczególnymi węzłami sieci mają znak dodatni.

Zakładając, że rozpatrywany jest układ liniowy z przebiegami sinusoidalnymi, to wartość skuteczną napięcia w węźle k można wyznaczyć z zależności

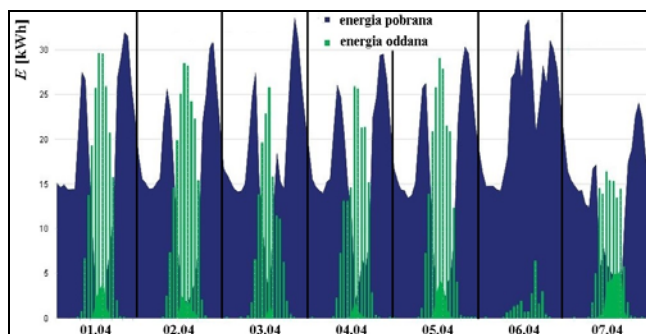
$$(1) U_k = U_0 - \sum_{k=1}^{k-1} \Delta U_{(k-1)k} = U_0 - \sum_{k=1}^{k-1} I_{(k-1)k} Z_{(k-1)k} = U_0 - \sum_{k=1}^{k-1} (I_{(k-1)k}^c R_{(k-1)k} - I_{(k-1)k}^b X_{(k-1)k})$$

gdzie: U_0 – wartość skuteczna napięcia po stronie niskiego napięcia transformatora V , $\Delta U_{(k-1)k}$ – wartość skuteczna spadku napięcia pomiędzy węzłami $(k-1)k$ V , $Z_{(k-1)k}$ – impedancja linii niskiego napięcia pomiędzy węzłami $(k-1)k$ Ω , $I_{(k-1)k}$ – wartość skuteczna prądu pomiędzy węzłami $(k-1)k$ A , $I_{(k-1)k}^c$, $I_{(k-1)k}^b$ – wartość skuteczna składowej czynnej i biernej prądu pomiędzy węzłami $(k-1)k$ A , $R_{(k-1)k}$, $X_{(k-1)k}$ – rezystancja i reaktancja linii niskiego napięcia pomiędzy węzłami $(k-1)k$ Ω .

Z kolei w przypadku, gdy do sieci dystrybucyjnej zostaną przyłączone źródła odnawialne, to prąd pomiędzy poszczególnymi węzłami może płynąć zarówno w kierunku końca sieci, jak i w kierunku stacji transformatorowej, stąd wartości skuteczne spadków napięć mogą przyjmować zarówno dodatni, jaki ujemny znak. W konsekwencji, w momencie nadprodukcji (niezbilansowania energii oddawanej do sieci przez źródła odnawialne z energią pobieraną przez odbiorców) może dojść do takiej sytuacji, w której wartości skuteczne spadków napięć pomiędzy wszystkimi węzłami sieci będą miały ujemny znak, co może prowadzić do wzrostu wartości skutecznej napięcia ponad wartość dopuszczalną i skutkować zadziałaniem zabezpieczeń nadnapięciowych falownika i jego wyłączeniem [4][5][6]. W takim przypadku, w celu wyznaczenia wartości skutecznej napięcia w węźle k , do wzoru (1) należy wstawić wartość skuteczną prądu $I_{(k-1)k}$ ze znakiem minus (dla przepływu prądu w kierunku stacji transformatorowej).

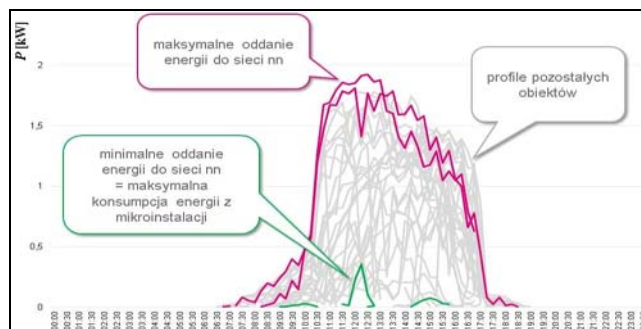
Profile generacji i poboru energii elektrycznej przez prosumentów i odbiorców

Dane odczytane z liczników bilansujących zlokalizowanych w stacjach transformatorowych SN/nn, dla których udział instalacji fotowoltaicznych wynosi powyżej 35% pokazują, że w okresach największego nasłonecznienia występuje nadprodukcja energii elektrycznej. Przykładowy tygodniowy bilans energii czynnej pobranej i oddanej dla jednej ze stacji transformatorowych o 48% udziale jednofazowych mikroinstalacji przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Godzinowy bilans energii czynnej E pobranej i oddanej dla stacji transformatorowej o 48% udziale jednofazowych mikroinstalacji za dni 1 – 7 kwietnia 2019 r. (opracowanie własne)

Z podobną sytuacją mamy do czynienia w przypadku, gdy porównamy ze sobą profile generacji mocy czynnej dla poszczególnych prosumentów z tej samej stacji transformatorowej SN/nn.

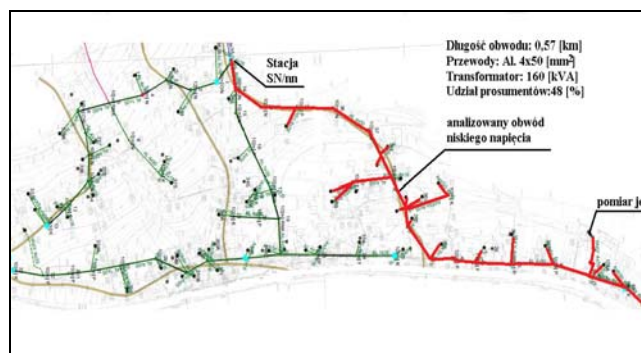


Rys. 7. Zbiorcze zestawienie profili generowanej mocy czynnej do sieci niskiego napięcia przez prosumentów przyłączonych do stacji transformatorowej SN/nn o 48% udziale mikroinstalacji (opracowanie własne)

Na podstawie rysunku 7 można zauważyć, że prosumenci w małym stopniu wykorzystują energię dostarczaną im przez jednofazowe mikroinstalacje fotowoltaiczne, stąd znaczna jej część jest wprowadzana do sieci dystrybucyjnej.

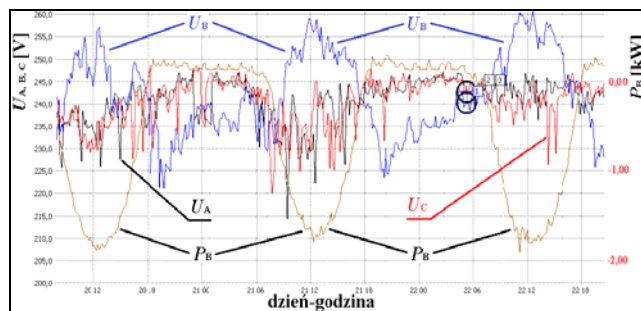
Wpływ jednofazowych mikroinstalacji na wybrane parametry jakości energii elektrycznej

W celu sprawdzenia wpływu jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych na parametry jakości energii elektrycznej, wybrano pewną sieć niskiego napięcia, o udziale mikroinstalacji wynoszącym 48%. Mapę układu sieci niskiego napięcia przedstawiono na rysunku 8.

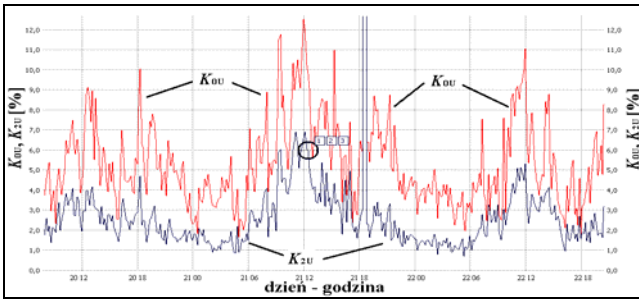


Rys. 8. Mapa obwodu sieci niskiego napięcia zlokalizowanej na terenie gminy Ochotnica Dolna (opracowanie własne)

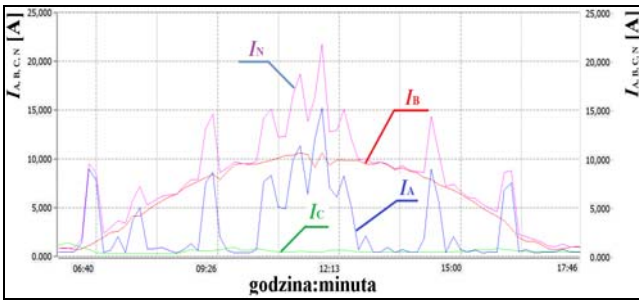
Pomiary parametrów jakości energii elektrycznej wykonano analizatorem klasy A, w złączu kablowym u jednego z ostatnich prosumentów na obwodzie. Na rysunkach 9 – 11 przedstawiono wybrane wyniki pomiarów za okres 20-22 kwietnia 2019 r.



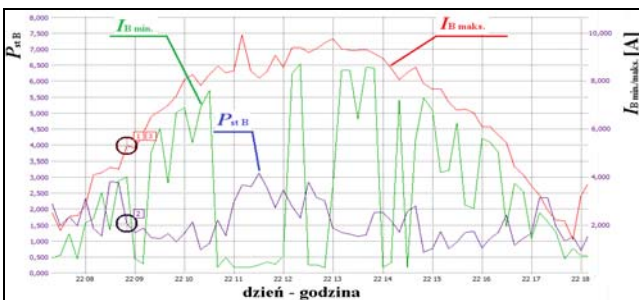
(a)



Rys. 9. Wykres maksymalnych (agregacja 200 ms) wartości skutecznych napięć fazowych (a) oraz współczynników asymetrii składowej symetrycznej kolejności zerowej K_{0U} i przeciwnej K_{2U} napięcia (b)



Rys. 10. Wykres wartości skutecznych prądów fazowych składowej podstawowej $I_{A,B,C}$ i wartości skutecznej prądu w przewodzie neutralnym I_N (agregacja 10 minut) zmierzonych na przyłączy prosumenta



Rys. 11. Wykres zmian współczynnika P_{st} dla fazy B i prądu składowego podstawowego maksymalnej $I_{Bmaks.}$ i minimalnej $I_{Bmin.}$ (agregacja 200 ms) dla fazy B

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wpływ 48% udziału jednofazowych mikroinstalacji fotowoltaicznych o mocy jednostkowej 2 kW, przyłączonych do sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia, na parametry takie jak: wartości skuteczne napięć fazowych $U_{A,B,C}$, współczynnik składowej symetrycznej kolejności zerowej K_{0U} i przeciwnej K_{2U} napięcia, wartości skuteczne prądów fazowych $I_{A,B,C}$, wartość skuteczną prąd w przewodzie neutralnym I_N oraz współczynnik krótkookresowego migotania światła P_{st} , zmierzonych na przyłączy do prosumenta.

Wyniki pomiarów przedstawione na rysunku 9 pokazują, że duża liczba mikroinstalacji o małej mocy jednostkowej przyłączona do jednej fazy układu trójfazowego powoduje wzrosty wartości skutecznych napięć i współczynników asymetrii ponad wartości dopuszczalne. Sytuacja ta występuje w przypadku niezbilansowania ilości energii oddawanej do sieci dystrybucyjnej z ilością energii pobieranej przez odbiorców w danym przedziale czasu.

Szczególnie wysokie wartości przyjmuje współczynnik składowej symetrycznej kolejności zerowej napięcia K_{0U} , dla którego nie ma określonych limitów w regulacjach krajowych i międzynarodowych [8-9]. Wysoki poziom

składowej symetrycznej kolejności zerowej napięcia wynika z przepływu znacznej wartości prądu przewodem neutralnym. Na rysunku 10 przedstawiono sytuację, w której podczas oddawania energii do sieci przez mikroinstalację przyłączoną do fazy B i jednoczesnym poborem energii na fazach A i C, prąd w przewodzie neutralnym N jest w pewnych przedziałach czasu dużo większy od prądów fazowych. Przepływ prądu przewodem neutralnym powoduje spadek wartości skutecznej napięcia na impedancji tego przewodu, co prowadzi do przesunięcia środka ciężkości gwiazdy napięć fazowych i skutkuje wysokim udziałem składowej symetrycznej kolejności zerowej w napięciu zasilającym [7]. W związku z dokonanymi obserwacjami, konieczne wydaje się opracowanie limitów udziału tej składowej w napięciu zasilającym, ponieważ jej wysoka zawartość jest związana z przyłączaniem jednofazowych mikroinstalacji do sieci niskiego napięcia, przez co znacząco wpływa ona na asymetrię i wzrosty wartości skutecznej napięcia.

Mikroinstalacje mają również wpływ na wahania napięcia w sieci dystrybucyjnej, co przedstawiono na rysunku 11. Wzrost współczynnika P_{st} zwłaszcza w godzinach 11 – 13 związany jest z dużą zmiennością prądu prosumenta, powodowaną dynamicznie zmieniającymi się warunkami nasłonecznienia. Na wzrost współczynnika P_{st} mają także wpływ pozostałe jednofazowe mikroinstalacje przyłączone do tej fazy obwodu niskiego napięcia.

Autorzy: mgr inż. Łukasz Topolski, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, E-mail: topolski@agh.edu.pl; mgr inż. Wojciech Schab, TAURON Dystrybucja S.A., Oddział w Krakowie, E-mail: wojciech.schab@tauron-dystrybucja.pl; dr inż. Andrzej Firlit, dr inż. Krzysztof Piątek, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: andrzej.firlit@keiaspe.agh.edu.pl, kpiatek@agh.edu.pl

Artykuł powstał w ramach projektu Gospostrateg1/385085/21/NCBR/2019 pt. „Rozwój energetyki rozproszonej w klastrach energii”

LITERATURA

- [1] Strona internetowa gminy Ochotnica Dolna, link: <http://www.ochotnica.pl> (dostęp: 19.09.2019 r.)
- [2] Norma PN-EN 50438:2014-02 Wymagania dla instalacji mikrogeneracyjnych przeznaczonych do równoległego przyłączenia do publicznych sieci dystrybucyjnych niskiego napięcia
- [3] Karta aktualizacji nr 7/2018 Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej z dnia 18 kwietnia 2019 r., 15-18
- [4] Demirok E., Sera D., Teodorescu R., et al.: Clustered PV Inverters in LV Networks: An Overview of Impacts and Comparison of Voltage Control Strategies, *IEEE Electrical Power and Energy conference (EPEC)*, Montreal, March 2010
- [5] Wasiak I., Hanzelka Z.: Integration of distributed energy sources with electrical power grid, *Bulletin of The Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, Vol. 57, No. 4, 2009
- [6] Lucas A., Single-Phase PV Power Injection Limit due to Voltage Unbalances Applied to an Urban Reference Network Using Real-Time Simulation, *MDPI AG*, 2018
- [7] Beharrysingh S. Doctoral thesis: Phase unbalance on low-voltage electricity networks and its mitigation using static balancer. *Loughborough University*, 2014
- [8] Rozporządzenie Ministra Gospodarki w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania system elektroenergetycznego z dnia 4 maja 2007 r., Dz. U. z 2007 r., poz. 623 z późniejszymi zmianami
- [9] Norma PN-EN 50160:2010, Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych, PKN, 2010